

다방향불규칙파중 선박의 유탄성응답해석

이승철*, 이창호***, 조효제****, 구자삼†**

부경대학교 해양산업개발연구소*
부경대학교 조선해양시스템공학과**
동명대학교 조선공학과***
한국해양대학교 해양시스템공학부****

A Hydroelastic Response Analysis of Ships in Multi-Directional Irregular Waves

Seung-Chul Lee*, Chang-Ho Lee***, Hyo-Jae Jo**** and Ja-Sam Goo†**

Research Center for Ocean Industrial Development, Pukyong National Univ.*
Dept. Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National Univ.**
Dept. of Naval Architecture, Tongmyong Univ.***
Div. of Ocean System Engineering, Korea Marine Univ.****

Abstract

When a large ship is advancing in waves, ship undergoes the hydroelastic response, and this have influence on structural stability and the fatigue destruction etc. of ship. The main objective of this research is to develop an accurate and convenient method on the hydroelastic response analysis of ships on the real sea states. We analyzed hydroelastic responses, which is formulated by finite element method. The numerical approach for the hydroelastic responses is based on the combination of the three dimensional source distribution method, the dynamic response analysis and the spectral analysis method. The calculated results show good agreement with the experimental and calculated ones by Watanabe.

※Keywords: Hydroelastic response(탄성응답), Fluid-structure interaction(유체구조상호간섭), Three-dimensional source distribution method(3차원 특이점분포법), Spectral analysis method(스펙트럴해석법)

1. 서론

선박이 파랑 중을 항해할 때, 선박은 탄성응답을 유발하게 되고, 이는 선박의 구조적 안전성과 피로파괴 등에 큰 영향을 미치고 있다. 정확한 탄

성응답을 추정하기 위해서는 종래의 파랑하중을 산정한 다음, 구조해석을 수행하는 2단계적인 방법보다는 유체-구조 상호간섭을 고려하여 일괄적으로 해석할 수 있는 기법개발이 긴요한 실정이다.

통상의 선박에 대한 유탄성 응답에 관해서 스트립이론(신구균 등 1992, 조대성과 김사수 1998) 및 경계요소법(정기태 등 1992, Chung 1987)을 적용한 연구결과가 발표된 바가 있다.

최근 선속의 영향을 합리적으로 도입하기 위해 전진속도가 있는 경우의 3차원 특이점분포법을 전침수 타원체 및 반침수 타원체에 적용하여 유탄성 응답을 구하는 방법이 발표되었으며(Du and Wu 1998), 고주파수 가정을 도입한 3차원 특이점분포법에 의한 연구(Chan 1993), 3차원 특이점분포법과 전진하면서 동요하는 그린함수를 이용한 연구(이호영 등 2003) 등도 발표된 바가 있다.

불규칙파중 선박에 대한 연구는 대부분이 한방향 불규칙파에 대한 것이 대부분이며(이호영 등 2001), 다방향 불규칙파중에 대한 연구는 해양구조물의 응답에 대한 연구는 있으나(Jo et al, 1992, Takezawa and Kobayashi 1989, 구자삼 등 1994), 다방향 불규칙파중 선박의 유탄성응답 해석을 수행한 논문은 찾아보기 힘든 실정이다.

본 연구에서는 실해역 상황을 고려하기 위해 탄성응답 해석법을 통해 얻어진 외각요소들의 값을 주파수응답함수로 이용하고 스펙트럴 해석법을 적용하여 다방향불규칙파중의 유탄성 응답특성을 평가한다. 본 해석법의 타당성을 검증하기 위해

Watanabe의 한방향 불규칙파중에서의 S175 container ship model에 대한 실험값 및 계산값(Watanabe et al. 1989)와 본 계산결과를 비교·검토하여, 본 계산기법의 타당성을 확인한다.

2. 탄성 응답해석

2.1 기본가정 및 좌표계

탄성응답 해석법에 의해 배의 동적 구조응답을 해석하기 위한 기본가정으로서 유체는 이상유체인 것으로 한다. 또, 각각의 평형위치에 대해 응답은 미소진폭의 조화진동을 하는 것으로 하고, 상부구조는 3차원 골조 선형 탄성구조로 한다. 또한, 자유표면은 모든 방향으로 무한히 펼쳐져 있는 것으로 하고, 수심이 유한인 경우에는 수심을 일정으로 한다.

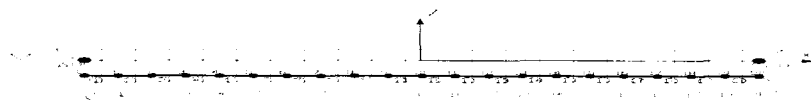
위의 가정에도 불구하고, roll 점성감쇠력은 외력으로 고려한다.

전체구조를 Fig. 1과 같이 요소로 분할하고, 각 요소는 그 역할에 따라 (1) 형상, 크기, 질량을 가지고, 외력을 받으며 강체로서 거동하는 외각요소(hull element)와 (2) 탄성체로서 외각요소의 절점을 연결하는 보요소(beam element) 등 2종류로 분류한다.

2.2 운동방정식

외각요소에 작용하는 유체압력은 그 외각요소의 절점에서의 힘과 모멘트로 평가한다.

각 절점에서 평가한 힘과 모멘트는 변위, 속도,



0,1,... : Node No.

①,②,... : Beam Element No.

⓪,①,... : Hull Element No.

Fig. 1 Element discretization of a ship

가속도의 미지량을 포함하기 때문에, 구조전체의 절점 변위벡터를 $\{\eta\}$ 라 하고 각 절점에 작용하는 힘과 모멘트를 결합해중으로써 구조 전체에 대한 다음과 같은 운동 방정식을 얻을 수 있다.

$$[-\omega^2([M_S] + [\mu]) - i\omega([C_S] + [\nu] + [\nu^V]) + ([K_S] + [K_P])] \{\eta\} = \{F^W\} \quad (1)$$

여기서,

- $[M_S]$: 전체 질량행렬
- $[\mu]$: 유체에 의한 전체 부가질량행렬
- $[C_S]$: 전체 구조감쇠행렬
- $[\nu]$: 전체 조파감쇠행렬
- $[\nu^V]$: 전체 roll 점성감쇠행렬
- $[K_S]$: 전체 강성행렬
- $[K_P]$: 정수압에 의한 전체 복원력행렬
- $\{F^W\}$: 파랑제력 벡터
- $\{\eta\}$: 구조전체의 절점 변위 벡터

식 (1)의 운동방정식을 푸는 것에 의해, 절점 변위 벡터 $\{\eta\}$ 가 구해진다.

2.2.1 구조감쇠행렬 및 점성감쇠행렬

전체 구조감쇠행렬은 다음과 같이 Rayleigh 감쇠를 이용하기로 한다.

$$[C_S] = a[M_S] + b[K_S] \quad (2)$$

여기서, a, b 는 비례상수이다. 보통 $a = 0$ 이고, b 에 대해서는 선체 2절 진동의 대수감쇠율 δ 와 그 고유진동수 ω_2 가 추정되는 경우에는 다음 식으로 구하기도 한다(Kuroiwa 1986).

$$b = \frac{\delta}{\pi \omega_2} \quad (3)$$

전체 점성감쇠행렬은 대각행렬이며, 대각요소는 각 절점의 roll에 대응하는 자유도에만 값을 갖고, 그 이외의 자유도에 대응하는 요소는 0이다. 각 절점의 roll 점성감쇠는 선체 중앙단면의 roll값을 이용하여 선체를 강체로 간주한 총 점성감쇠를 평가한 후(Ikeda 1984), 각 절점에 대응하는 외각요소의 침수표면적에 비례 배분한 것이다.

2.2.2 부가질량행렬 및 조파감쇠행렬

부가질량행렬 및 조파감쇠행렬을 구하기 위해 2가지의 방법을 사용해서 비교·검토하였다.

2.2.2.1 Full Hull Rotation Method

배의 기준좌표계의 원점을 운동기준점으로 한 6자유도의 강체모드의 방사포텐셜 $\phi_k (k=1 \sim 6)$ 가 구해지면 외각요소 l 의 절점 (x_0^l, y_0^l, z_0^l) 을 운동기준점으로 한 6자유도의 강체모드의 방사포텐셜 ϕ_k^l 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_1^l &= \phi_1, \phi_2^l = \phi_2, \phi_3^l = \phi_3 \\ \phi_4^l &= \phi_4 - y_0^l \phi_3 + z_0^l \phi_2 \\ \phi_5^l &= \phi_5 - z_0^l \phi_1 + x_0^l \phi_3 \\ \phi_6^l &= \phi_6 - x_0^l \phi_2 + y_0^l \phi_1 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, N 은 외각요소의 총 갯수이다.

2.2.2.2 Sectional Hull Rotation Method

개별의 6자유도 강체운동을 하는 외각요소들로 구성된 구조물에 대하여 각 외각요소 $l (l=1,2,\dots,N)$ 의 절점 (x_0^l, y_0^l, z_0^l) 를 운동기준점으로 한 외각요소 각각의 6자유도 운동을 고려하면, N 개의 외각요소로 구성된 구조물의 방사포텐셜 $\phi_k (k=1 \sim 6)$ 를 구하기 위한 경계치 문제는 다음과 같다.

$$\nabla^2 \phi_k = 0 \quad \text{in } \Omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} - k \phi_k = 0 \quad \text{on } S_F \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad (7a)$$

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \text{grad } \phi_k = 0 \quad \text{on } S_B \quad (7b)$$

$$\frac{\partial \phi_k}{\partial n} = n_k^l + i \frac{U}{\omega} m_k^l (l=1,2,\dots,N) \quad \text{on } S_H \quad (8)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} \sqrt{R} \left(\frac{\partial \phi_k}{\partial R} - ik \phi_k \right) = 0 \quad \text{on } S_R \quad (9)$$

여기서, 식(6)는 선체의 운동(만남)주파수 ω 를 고주파수로 가정한 자유표면경계조건이고, 식(8)의 n_k^l 는 각 축에 평행한 단위속도운동에 의한 외각요소 l 의 표면에서의 운동 속도의 법선방향성분 ($k=1 \sim 3$) 및 외각요소 l 의 절점 (x_0^l, y_0^l, z_0^l) 에 대한 각 축 둘레의 단위각속도 운동에 의한 외각요소 표면에서의 운동속도의 법선방향성분 ($k=4 \sim 6$)으로 다음과 같다.

$$\begin{aligned} n_1^l &= n_x, n_2^l = n_y, n_3^l = n_z \\ n_4^l &= (y^l - y_0^l) n_z - (z^l - z_0^l) n_y \\ n_5^l &= (z^l - z_0^l) n_x - (x^l - x_0^l) n_z \\ n_6^l &= (x^l - x_0^l) n_y - (y^l - y_0^l) n_x \end{aligned} \quad (10)$$

m_k^l 은 다음의 관계를 만족한다.

$$m_k^l = 0 \quad (k=1 \sim 4)$$

$$m_5^l = n_3^l, \quad m_6^l = -n_2^l$$

위의 경계치문제(방사문제)를 풀어서 ϕ_k 가 구해지면, 외각요소 l 의 방사포텐셜 ϕ_k^l 은 다음과 같다.

$$\phi_k^l = \phi_k \quad (11)$$

식(4)와 (11)을 통해서 방사포텐셜 ϕ_k^l 이 구해지면, 외각요소 l 에 작용하는 동유체력은 속도에 비례하는 힘과 가속도에 비례하는 힘으로 분리할 수 있고, 속도에 비례하는 힘을 $\{F_N^{RI}\}$ 라하고, 가속도에 비례하는 힘을 $\{F_A^{RI}\}$ 라 하면, 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_N^{RI}\} = -[\nu_{jk}^l] \{\dot{\eta}^l\}, \quad (j, k=1 \sim 6) \quad (12)$$

$$\{F_A^{RI}\} = -[\mu_{jk}^l] \{\ddot{\eta}^l\}, \quad (j, k=1 \sim 6) \quad (13)$$

$$[\mu_{jk}^l] = \left[-\frac{\rho}{\omega} Re \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k^l ds \right] \quad (14)$$

$$[\nu_{jk}^l] = \left[-\rho Im \int \int_{S_H^l} n_j^l (\omega - iU \frac{\partial}{\partial x}) \phi_k^l ds \right] \quad (15)$$

이고, μ_{jk}^l 과 ν_{jk}^l 은 각각 외각요소 l 에 대하여 k 방향의 운동에 의한 j 방향에의 부가질량 및 감쇠계수이고, S_H^l 는 외각요소 l 의 침수표면적이다. $[\mu_{jk}^l], [\nu_{jk}^l]$ 는 기준좌표계에 대한 외각요소 l 의 부가질량행렬, 조파감쇠행렬이다.

2.2.3 복원력행렬

임의의 외각요소 l 의 절점 (x_0^l, y_0^l, z_0^l) 에서의 정적 유체압력과 중력에 기인하는 복원력에 대한 외각요소 l 의 복원력행렬은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[K_p^l] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{33} & K_{34} & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & K_{43} & K_{44} & K_{45} & K_{46} \\ 0 & 0 & K_{53} & K_{54} & K_{55} & K_{56} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서,

$$K_{33} = \rho g S_0^l, \quad K_{34} = \rho g \int \int_{S_0^l} (y' - y_0') dA$$

$$K_{35} = -\rho g \int \int_{S_0^l} (x' - x_0') dA$$

$$K_{44} = \rho g \int \int_{S_0^l} (y' - y_0')^2 dA + \rho g V_0^l (z_b^l - z_0^l) - m^l g (z_g^l - z_0^l)$$

$$K_{45} = -\rho g \int \int_{S_0^l} (x' - x_0') (y' - y_0') dA$$

$$K_{46} = -\rho g V_0^l (x_b^l - x_0^l) + m^l g (x_g^l - x_0^l)$$

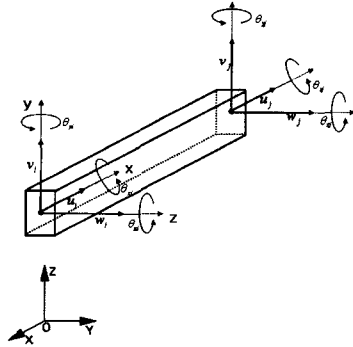


Fig. 2 Local coordinate and beam element

$$K_{43} = K_{34}, \quad K_{53} = K_{35}, \quad K_{54} = K_{45}$$

$$K_{55} = \rho g \int \int_{S_0^l} (x' - x_0')^2 dA + \rho g V_0^l (z_b^l - z_0^l) - m^l g (z_g^l - z_0^l)$$

$$K_{56} = -\rho g V_0^l (y_b^l - y_0^l) + m^l g (y_g^l - y_0^l)$$

여기서, m^l 및 V_0^l 은 외각요소 l 의 질량 및 배수용적, (x_g^l, y_g^l, z_g^l) 은 외각요소의 l 의 무게중심, (x_b^l, y_b^l, z_b^l) 은 외각요소 l 의 부심, $S_0^l = \int \int_{S_0^l} dA$ 는 외각요소 l 의 수선면적이다.

2.2.4 강성행렬 및 질량행렬

Fig. 2와 같은 절점 i 와 j 사이의 요소에 대한 국소좌표계 (x, y, z) 및 그 자유도 $\{u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}, u_j, v_j, w_j, \theta_{xj}, \theta_{yj}, \theta_{zj}\}$ 를 갖는 보의 요소 강성행렬 및 요소 질량행렬은 전단변형 및 회전관성을 각각 고려하면 다음과 같다.

•요소 강성행렬

$$[K_S]^e = \begin{bmatrix} [K_{11}] & [K_{12}] \\ [K_{21}] & [K_{22}] \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서,

$$[K_{11}] =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2-\nu}{1+\nu} \frac{EI}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} & 0 & 0 & \frac{(4+\nu)EI}{(1+\nu)l} \end{bmatrix}$$

$$[K_{12}] =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{-12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & \frac{-6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2-\nu}{1+\nu} \frac{EI}{l} & 0 \\ 0 & \frac{-6EI}{(1+\nu)l^2} & \frac{-6EI}{(1+\nu)l^2} & 0 & 0 & \frac{(2-\nu)EI}{(1+\nu)l} \end{bmatrix}$$

$$[K_{21}] =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{-12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2-\nu}{1+\nu} \frac{EI}{l} & 0 \\ 0 & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} & 0 & 0 & \frac{(4+\nu)EI}{(1+\nu)l} \end{bmatrix}$$

$$[K_{22}] =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & 0 & \frac{-6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & \frac{12EI}{(1+\nu)l^3} & 0 & 0 & \frac{6EI}{(1+\nu)l^2} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2-\nu}{1+\nu} \frac{EI}{l} & 0 \\ 0 & \frac{-6EI}{(1+\nu)l^2} & \frac{-6EI}{(1+\nu)l^2} & 0 & 0 & \frac{(4+\nu)EI}{(1+\nu)l} \end{bmatrix}$$

•요소 질량행렬

$$[M_S]^e = \rho A l \begin{bmatrix} [M_{11}] & [M_{12}] \\ [M_{21}] & [M_{22}] \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기서,

$$\begin{aligned} [M_{11}] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{111}{210} \frac{I}{10.4I} \end{bmatrix} & [M_{12}] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{111}{210} \frac{I}{10.4I} \end{bmatrix} \\ [M_{21}] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{111}{210} \frac{I}{10.4I} \end{bmatrix} & [M_{22}] &= \begin{bmatrix} \frac{1}{6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{13}{35} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{9}{70} \frac{6I}{5.4I^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{111}{210} \frac{I}{10.4I} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

식 (17)와 (18)에서, E, G 는 각각 보요소의 종탄성계수, 전단탄성계수이고, l 은 보요소의 길이이다. 또, I_y 와 I_z 는 각각 y 축 및 z 축에 관한 단면 2차 모멘트이고, J 는 비틀림 계수이다.

A 및 ρ 는 각각 보요소의 단면적 및 밀도이고, Φ_y 와 Φ_z 는 각각 다음과 같다.

$$\Phi_y = \frac{12EI_z}{GA_{sy} l^2}, \quad \Phi_z = \frac{12EI_y}{GA_{sz} l^2} \quad (19)$$

여기서, A_{sy} 와 A_{sz} 는 각각 y, z 방향의 전단력이 작용할 때의 유효단면적이다.

2.2.5 파강제력 벡터

외각요소 l 의 입사파 속도포텐셜 ϕ_l^i 은 다음과 같다.

$$\phi_l^i = \phi_j \quad (20)$$

외각요소 l 에 작용하는 기준좌표계에 대한 입사파에 의한 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \{F_j^i\} &= \left\{ -\rho \int \int_{S_H} (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_l^i n_j^i ds \right\} \\ &= -i\rho\omega \int \int_{S_H} \phi_l^i n_j^i ds, (j=1 \sim 6) \end{aligned} \quad (21)$$

산란포텐셜 ϕ_D 는 경계치 문제(산란 문제)의 해로서 구해진다. 산란포텐셜 ϕ_D 가 구해지면 외각요소 l 의 산란포텐셜 ϕ_D^l 는 다음과 같다.

$$\phi_D^l = \phi_D \quad (22)$$

외각요소 l 에 작용하는 기준좌표계에 대한 산란파에 의한 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \{F_j^{Dl}\} &= \left\{ -\rho \int \int_{S_H} n_j^l (i\omega + U \frac{\partial}{\partial x}) \phi_D^l ds \right\} \\ &= \left\{ -i\rho\omega \int \int_{S_H} n_j^l \phi_D^l ds - \rho U \int \int_{S_H} n_j^l \frac{\partial \phi_D^l}{\partial x} ds \right\} \\ &, (j=1 \sim 6) \end{aligned} \quad (23)$$

그러므로, 외각요소 l 의 절점에 작용하는 파강제력 벡터는 다음과 같이 구해진다.

$$\{F_j^{Wl}\} = \{F_j^i\} + \{F_j^{Dl}\}, (j=1 \sim 6) \quad (24)$$

2.3 다방향파 스펙트럼

다방향파의 스펙트럼 $S_{\zeta\zeta}(\omega, \chi)$ 는 각 주파수 성분파의 방향 χ 에 따른 분포를 나타내는 방향분포함수(Directional Distribution Function) $D(\omega, \chi)$ 와 주파수 ω 에 따른 파 에너지 분포를 나타내는 1차원 파 스펙트럼 $S_{\zeta\zeta}(\omega)$ 에 의해 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{\zeta\zeta}(\omega, \chi) = D(\omega, \chi) S_{\zeta\zeta}(\omega) \quad (25)$$

방향분포함수 $D(\omega, \chi)$ 의 일반적인 모델은 주파수에 대해 독립인 여현분포함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$D(\chi) = \frac{\Gamma(S+1)}{\sqrt{\pi} \Gamma(S+\frac{1}{2})} \cos^{2S}(\chi - \theta_0) \quad (26)$$

여기서, $\chi = \theta + \theta_0$ 이며 θ_0 는 입사파의 주방향, θ 는 주방향과 성분파의 진행방향인 이루는 각을 표시하고, S 는 파 에너지의 방향에 따른 분포의 분산 정도를 나타내는 파라메타로써, $S \rightarrow \infty$ 일 때, 한방향파(One-directional Waves) 즉, 장파정파가 된다. 그리고 방향분포 파라메타 S 를 변화시켜도 에너지가 일정하게 되도록 방향분포함수 $D(\chi)$ 의 θ 에 대한 적분값을 다음과 같이 정규화시킬 필요가 있다.

$$\int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} D(\theta) d\theta = 1 \quad (27)$$

본 연구에서 사용된 1차원 파 스펙트럼은 ISSC(International Ship Structure Congress) 스펙트럼으로 다음과 같이 표현된다.

$$S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_{1/3}^2 T_1 \left(\frac{T_1}{2\pi}\omega\right)^{-5} \text{EXP} \left[-0.44 \left(\frac{T_1}{2\pi}\omega\right)^{-4}\right] \quad (28)$$

여기서, ω 는 파의 원주파수(Circular Frequency, rad/sec), $H_{1/3}$ 은 유의파고(Significant Wave Height), T_1 은 평균 파주기(Mean Wave Period)이다.

선형입출력계에 있어서, 입력에 대한 출력은 단위충격응답함수(Unit Impulse Response Function)와 입력의 시간력과의 Convolution Integral로 표현되어진다. 여기서는 입력으로서 방향파의 수면상승량 $\zeta(t, x)$ 를 취했을 때, 출력을 선박의 각 응답 $x(t, x)$ 로 표시한다. 단, t 는 시간, x 는 위치벡터를 나타낸다. 수면 상승량 및 응답의 자기상관함수는 각각 다음과 같이 표기된다.

$$R_{\zeta\zeta}(\tau, \delta) = E[\zeta(t, x) \cdot \zeta(t + \tau, x + \delta)] \quad (29)$$

$$R_{xx}(\tau, \delta) = E[x(t, x) \cdot x(t + \tau, x + \delta)] \quad (30)$$

여기서, τ 는 시간차이고, δ 는 위치벡터의 차를 나타낸다. 응답의 자기상관함수는 단위충격함수를 이용하여 표현하면 아래와 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} R_{xx}(\tau, \delta) &= \iiint \iiint \int \int \int \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &\times E[\zeta(t - \tau_1, x - \delta_1) \zeta(t + \tau - \tau_2, x + \delta - \delta_2)] d\tau_2 d\delta_2 d\tau_1 d\delta_1 \\ &= \iiint \iiint \int \int \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau_1, \delta_1) h(\tau_2, \delta_2) \\ &\times R_{\zeta\zeta}(\tau + \tau_1 - \tau_2, \delta + \delta_1 - \delta_2) d\tau_2 d\delta_2 d\tau_1 d\delta_1 \end{aligned}$$

여기서, Wiener-Khinchine 공식,

$$R_{xx}(\tau, \delta) = \int \int \int_{-\infty}^{\infty} S_{xx}(\omega, K) e^{i(K\delta - \omega\tau)} dK d\omega \quad (31)$$

을 뒷 식에 적용하면 응답 스펙트럼이 다음과 같이 구해진다.

$$S_{xx}(\omega, K) = |H_{x\zeta}(\omega, K)|^2 S_{\zeta\zeta}(\omega, K) \quad (32)$$

따라서, 주방향 θ_0 인 다방향파에 대한 주파수 응답스펙트럼 $S_{xx}(\omega, \theta_0)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S_{xx}(\omega, \theta_0) = \int_{-\pi}^{\pi} |H_{x\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)|^2 S_{\zeta\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta) d\theta \quad (33)$$

단, $H_{x\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)$ 는 선박의 주파수응답함수(단위진폭의 규칙파에 대한 응답)로서 구성부재간의 유체역학적 상호간섭효과를 고려하여 내력응답 및 운동응답을 동시에 구할 수 있는 동적응답해석법

을 이용하여 구해지며, $S_{\zeta\zeta}(\omega, \theta_0 + \theta)$ 는 다방향파 스펙트럼을 나타내고 있다.

이와 같은 방법으로 동적응답 스펙트럼이 구해지면 불규칙파중에서의 동적응답진폭의 유의치(Significant Value)는 다음과 같이 주어진다.

$$X_{1/3}(\theta_0) = 2.0 \sqrt{m_0(\theta_0)} \quad (34)$$

여기서, $m_0(\theta_0)$ 는 스펙트럼의 0 차 모멘트로서 분산을 나타내고, 다음 식에 의해 구해진다.

$$m_0(\theta_0) = \int_0^{\infty} S_{xx}(\omega, \theta_0) d\omega$$

3. 수치계산 결과 및 고찰

Watanabe는 S175 container ship을 대상으로 선수 플래어의 영향을 알아보기 위해, 모델을 제작하여 실험을 행하였다. 모델에 대한 주요목은 Table 1과 같다.

계산방법은 Watababe의 실험조건과 동일하게 Table 2의 조건에서 ISSC 스펙트럼을 사용하여 계산을 수행하였다. 방향분포 파라메타 S에 대해서는 다방향파를 대표하여 ITTC에서 권장하는 방향분포와 동일한 형으로 S=2인 경우, S=4인 경우와 한방향파를 나타내는 S=∞인 경우의 유의치를 고찰한다.

Table 1 Principal particulars

	Ship	Model
L (m)	175.0	4.5
B (m)	25.4	0.653
D (m)	15.4	0.396
Draft (m)	9.5	0.244
Disp. (ton)	24742.0	0.412
EI(midship) (Kgmm ²)	2.28×10 ¹⁸	3.61×10 ¹⁰

Table 2 Wave conditions(Irregular wave)

Fn	0.17, 0.21, 0.25
T_p	2.32 sec
h_s	21cm
β	180°

Fig. 3은 Watanabe의 실험모델을 보이고 있다. Watanabe는 에폭시 레진과 우레탄으로 선각을 만들고, 실선의 굽힘강성 특성을 재현하기 위해 나무로써 강성을 키웠다. 따라서, Watanabe의 모델은 유연한 구조를 갖도록 제작되었음에도 불구하고

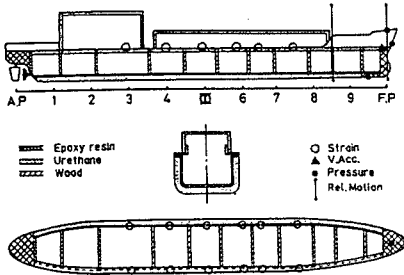


Fig. 3 Arrangement of measuring stations of Watanabe's model

고 강성이 커짐에 따라 강체에 가까운 모델이라고 할 수 있을 것이다.

Fig. 4는 방사포텐셜 계산의 2가지 방법에 대해 도식화하고 있다.

Fig. 5-Fig. 7은 선속의 변화에 따른 한방향 불규칙파($S=\infty$)에 대하여 $0.5\rho g H_s B L^2$ 로 무차원화된 수직굽힘모멘트의 선체 길이방향 분포를 나타내었다. Fig. 5는 $F_n=0.17$ 인 경우의 분포를 보이고 있다. Watanabe의 실험값과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 선속이 작으므로, FHRM의 결과와 SHRM의 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. Fig. 6은 $F_n=0.21$ 인 경우의 분포를 나타내고 있다. 전반적으로 실험값과 잘 일치하고 있다. Fig. 7은 $F_n=0.25$ 인 경우의 분포를 나타내고 있다. 실험값과 잘 일치함을 알 수 있다. 선속이 증가함에 따라 FHRM을 고려한 결과와 SHRM을 고려한 결과

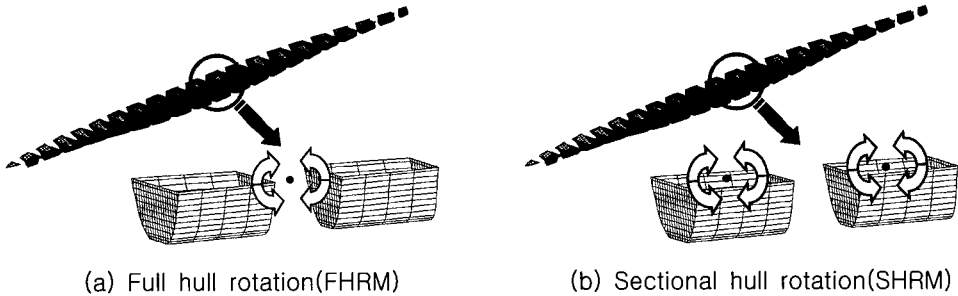


Fig. 4 Mono hull rotation and multi hull rotation

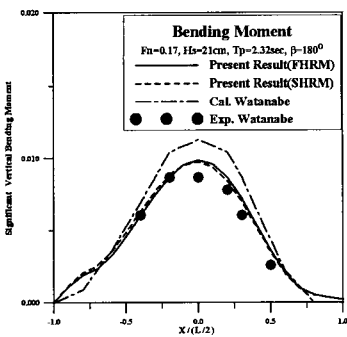


Fig. 5 Longitudinal distribution of significant vertical bending moment ($F_n=0.17$)

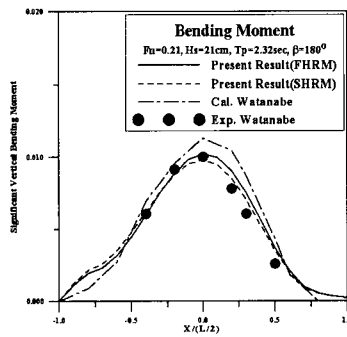


Fig. 6 Longitudinal distribution of significant vertical bending moment ($F_n=0.21$)

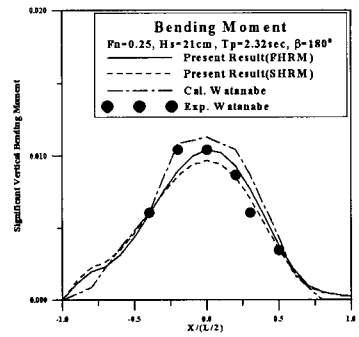


Fig. 7 Longitudinal distribution of significant vertical bending moment ($F_n=0.25$)

의 차이가 조금씩 생기기 시작하고 있다.

Fig. 8~Fig. 11은 입사파의 주방향의 변화와 방향파 파라미터의 변화(한방향파 $S=\infty$, 다방향파 $S=2, 4$)에 따른 유의치를 나타내고 있다. Fig. 8은 pitch 응답을 보이고 있다. 주방향이 180° 의 경우 다방향파의 영향이 거의 나타나지 않지만, 횡파로 갈수록 다방향파의 영향이 나타남을 알 수 있다. Fig. 9는 station no.6($-L/4$)에서의 수직 굽힘모멘트를 나타내고 있다. 주방향이 변화함에 따라 FHRM을 고려한 결과와 SHRM을 고려한 결과의 차이가 나타나고 있다. SHRM을 고려한 결과

가 FHRM을 고려한 결과에 비해 다방향파의 영향이 적음을 알 수 있다. Fig. 10은 midship에서의 수직 굽힘모멘트를 나타내고 있다. 주방향이 $225^\circ\sim 255^\circ$ 부근에서 다방향파의 영향이 작음을 알 수 있다. Fig. 11은 station no.15($L/4$)에서의 수직 굽힘모멘트를 보이고 있다. 전반적으로 다방향파의 영향이 적음을 알 수 있다. 주방향이 선수파인 경우 다방향파의 영향이 거의 나타나지 않지만 횡파로 갈수록 다방향파의 영향이 나타나는데, 사파의 경우가 가장 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

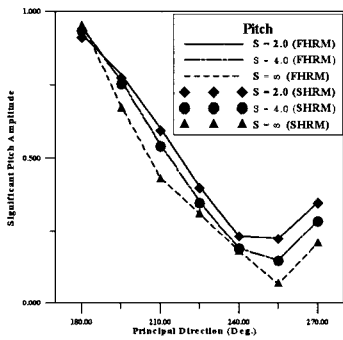


Fig. 8 Significant pitch amplitude for various principal directions and parameters of direction function

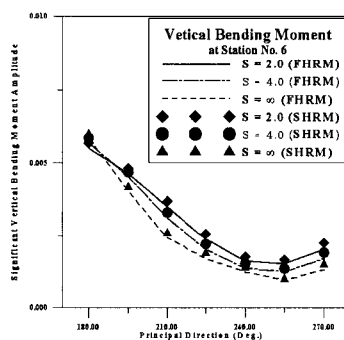


Fig. 9 Significant vertical bending moment for various principal directions and parameters of direction function at station No. 6

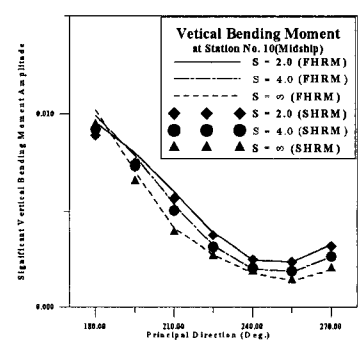


Fig. 10 Significant vertical bending moment for various principal directions and parameters of direction function at midship

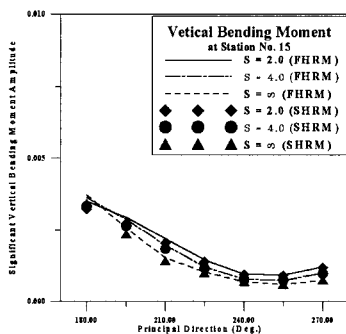


Fig. 11 Significant Vertical Bending Moment Amplitude for Various Principal Directions and Parameters of Direction Function at Station No. 15

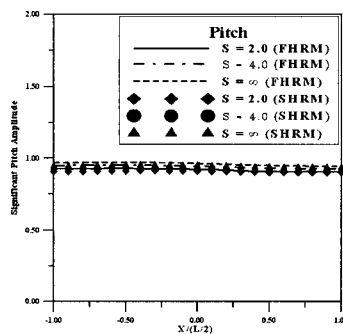


Fig. 12 Longitudinal Distribution of Significant Pitch Amplitude($F_n=0.25$)

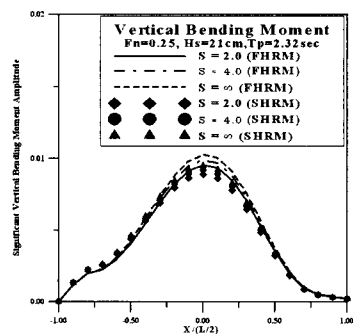


Fig. 13 Longitudinal Distribution of Significant Vertical Bending Moment Amplitude($F_n=0.25$)

Fig. 12 - Fig. 13은 주방향 $\theta=180^\circ$ 에서 방향파 파라미터의 변화에 따른 응답값의 선체 길이방향 분포를 보이고 있다. Fig. 12는 Pitch 응답을 보이고 있다. Pitch의 경우는 전체적으로 다방향파의 영향이 나타나고 있으며, 길이방향으로 큰 변화가 없음을 알 수 있다. Fig. 13은 수직굽힘모멘트를 보이고 있다. 중앙부쪽에서 다방향파의 영향이 나타나고, 선수 및 선미 쪽으로 갈수록 영향이 작게 나타나고 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서 취급한 계산모델 및 계산조건 하에서 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) Watanabe의 S175 container ship model에 대한 불규칙파중의 실험치 및 계산치와 본 해석법에 의한 계산치를 서로 비교·검토한 결과 본 계산기법의 타당성이 검증되었다.

(2) 불규칙파중을 항행하는 Watanabe 모델이 실선의 굽힘강성 특성을 가진 탄성모델이므로 실험값과 불규칙파에 대한 FHRM을 고려한 탄성응답해석결과가 잘 일치함을 알 수 있었다.

(3) 다방향 불규칙파중의 유탄성응답해석을 통해, 선수파의 경우 다방향파의 영향이 작지만, 횡파로 갈수록 다방향파의 영향이 나타나며, 사파의 경우에 다방향파의 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2006학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음(PK-2006-066)

참 고 문 헌

- 구자삼, 조효제, 이창호, 1994, "다방향 불규칙파의 TLP의 동적응답해석," 한국해양공학회지, 제 8권, 제1호, pp. 23-32.
- 신구균, 김사수, 손성완, 1992, "선박의 비선형 유체력을 고려한 파랑중 동적 강도 해석법에 관한 연구," 대한조선학회 논문집, 제 29권, 제 4호, pp. 152-172.
- 이호영, 박홍식, 신현경, 2001, "불규칙파중에서 전진하는 선박에 대한 시간영역응답해석," 대한조선학회 논문집, 제 38권, 제 3호, pp. 47-53.
- 이호영, 임춘규, 정형배, 2003, "파랑중 전진하는 선박의 유탄성 응답," 대한조선학회 논문집, 제 40권, 제 4호, pp. 16-21.
- 정기태, 김영복, 강호승, 노종현, 1992, "접수구조물 진동의 유력탄성해석," 대한조선학회 논문집, 제 29권, 제 1호, pp. 135-142.
- 조대성, 김사수, 1998, "선체 저차 상하 고유진동 강도해석," 대한조선학회 논문집, 제 35권, 제 3호, pp. 54-61.
- Chan, H.S, 1993, "Prediction of Motion and Wave Loads of Twin-hull Ships," Marine Structures, Vol. 6, pp. 75-102.
- Chung, K.T, 1987, "On the Vibration of the Floating Elastic Body Using Boundary Integral Method in Combination with Finite Element Method," SNAK, Vol. 24, No. 4, pp. 19-36.
- Du, S.X. and Wu, Y.S., 1998, "The Effect of Forward Speed on Hydroelastic Behaviors of Ship Structures," Practical Design of Ships and Mobile Units, pp. 597-603.
- Ikeda, Y., 1984, "Roll Damping of Ships," 1st Marine Dynamics Symposium, pp. 241-250.
- Jo, H.J., Maeda, H. and Miyajima, S., 1992, "Effects of Directional Waves on the Behaviour of Semisubmersible Rigs," PRADS, pp. 116-129.
- Kuroiwa, T., 1986, A Study on Structural Response of Ship in Large Amplitude Waves, Tokyo Univ. PhD. Thesis.
- Takezawa, S. and Kobayashi, K., 1989, "On the Motion Responses of Offshore Floating Structures in Directional Spectra Waves," Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 165, pp. 141-152.
- Watanabe, I., Ueno, M. and Sawada, H., 1989, "Effects of Bow Flare Shape to the Wave Loads of a Container Shp," Journal of the

Society of Naval Architects of Japan, Vol. 166,
pp. 259-266.



< 이 승 철 >



< 이 창 호 >



< 조 효 제 >



< 구 자 삼 >